

Рисунок 2. НПХ для омического делителя напряжения ОДН–1

Из расчетной кривой НПХ, представленной на рис. 2, следует, что собственное время нарастания НПХ (время, в течение которого численное значение НПХ изменяется между уровнями 0,1–0,9 от своего максимального значения), для исследуемого высоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН–1 составляет примерно 209 нс.

Известно, что для достоверной и надежной регистрации быстроизменяющихся импульсов напряжения необходимо, чтобы собственное время нарастания измерительного прибора было на порядок меньше времени нарастания измеряемого импульсного сигнала [3]. Таким образом, с помощью рассматриваемого высоковольтного омического делителя напряжения ОДН–1, созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в отделе электромагнитных испытаний, можно уверенно регистрировать испытательные импульсы напряжения микро- и миллисекундной длительности. Отметим, что эти расчетные результаты хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований омического делителя напряжения ОДН–1, которые приведены в [1,2].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведен приближенный расчет паразитных электрических параметров высоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН–1 на номинальное входное напряжение 1 МВ. Из выполненных расчетов следует, что емкость относительно земли  $C_3$  в делителе ОДН–1 составляет  $4,5 \cdot 10^{-11}$  Ф, а продольная емкость исследуемого делителя  $C_p$  равна  $1,98 \cdot 10^{-11}$  Ф. При определении полной индуктивности делителя ОДН–1 индуктивностью его НП можно пренебрегать. Определение паразитной индуктивности при расположении керамических резисторов типа ТВО-5-100 Ом в его ВП «елочкой» является весьма трудоемкой задачей. Поэтому индуктивность ВП исследуемого делителя можно опре-

делять как среднее арифметическое между индуктивностями при расположении его керамических резисторов типа ТВО-5-100 Ом в ВП в виде бифиляра и в виде прямолинейных отрезков металлического проводника соответствующих геометрических размеров. С учетом такого приближенного подхода расчетное значение индуктивности  $L$  высокоомного делителя напряжения типа ОДН–1 численно составляет 27,45 мкГн.

2. Расчетное собственное время нарастания НПХ высоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН–1 равно около 209 нс.

3. Исследуемый высоковольтный омический делитель напряжения типа ОДН–1 может быть использован в качестве рабочего измерительного средства при измерении в лабораторных условиях быстро изменяющихся апериодических и синусоидальных импульсов напряжения микро- и миллисекундной длительности с уровнем амплитуды до 1 МВ.

**Список литературы:** 1. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зиньковский В.М. и др. Омический делитель напряжения для измерения испытательных грозовых и коммутационных импульсов амплитудой до 1 МВ // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 20. – С. 20-30. 2. Баранов М.И., Свічкарь О.С. Електрофізичні особливості розробки і створення високоомного подільника напруги на 1 МВ // Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (4 – 6 червня 2008 р., м. Харків). – ч. 2, Харків: НТУ «ХПИ», 2008. – С. 342. 3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения / Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 4. Иосель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с. 5. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с. 6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 559 с.

Поступила в редколлегию 09.11.2009

УДК 621.3:537.3

**М.И.БАРАНОВ**, докт.техн.наук, главн.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;  
**В.О.ЛЫСЕНКО**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## ПРИБЛИЖЕННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРЯМОГО УДАРА В НЕЕ ЛИНЕЙНОЙ МОЛНИИ

Надані дві спрощені розрахункові електродинамічні моделі руйнування деревини і результати наближеного оцінювання за ними механічного напруженого стану деревини сосни, яка зазнає прямий удар лінійної блискавки та подовжнє розповсюдження нею сильноточного низькотемпературного плазмового каналу. Показано, що електродинамічна дія лінійної блискавки на вказану деревину може приводити до її механічного радіального розколювання.

Two the simplified calculation electrodynamic models of destruction of wood and results of approximate estimation of their mechanical tense state of pine-tree wood, by a testing line blow of linear lightning and longitudinal distribution on it of its heavy-current low temperature plasma channel are given. It is shown that the electrodynamic effects of linear lightning on the specified linear wood can result in its mechanical radial cleaving.

**ВВЕДЕНИЕ.** В области инженерной электрофизики, а также в технике высоких напряжений (ТВН) и больших импульсных токов (БИТ) при создании мощных электрофизических установок (ЭФУ) на рабочие импульсные напряжения порядка 1 МВ и токи до 1 МА нашла практическое применение наружная изоляция, базирующаяся на древесине хвойных пород [1–3]. Кроме того, во всем мире при возведении многих строительных конструкций технических зданий и сооружений также используется древесина разных пород [4]. Наиболее широкое распространение при этом в строительной индустрии, ТВН, технике БИТ и их ЭФУ получили конструкции, основанные на клееной древесине – деревянные клееные конструкции (ДКК) [1–3]. Размеры таких ДКК, изготовленных, в основном, из древесины хвойных пород и расположенных на открытом воздухе, зачастую составляют, прежде всего по их высоте, десятки метров. В связи с этим появляется реальная угроза их поражения в воздушной атмосфере прямым ударом молнии (ПУМ), среднестатистические амплитудно-временные параметры (АВП) импульсной компоненты тока которой характеризуются уровнями в десятки (сотни) килоампер при ее фронте от единиц до десятков микросекунд и полной длительности до сотен микросекунд [5]. Электротепловые и электродинамические процессы, протекающие в древесине как ДКК технических зданий и сооружений, так и природных объектов – деревьев (рис. 1 и 2 [6,7]) при ее поражении ПУМ, в настоящее время остаются практически не исследованными. Поэтому несомненный научный и практический интерес как для электрофизики молнии, так и указанной техники при оценке ее стойкости к действию ПУМ с заданными АВП тока молнии представляет изучение в упомянутой древесине таких процессов, имеющих электрофизическую природу.

Заметим, что приведенное на рис.1 электрофизическое событие поражения летом ПУМ дерева лиственной породы было зафиксировано иностранными исследователями линейной молнии [6], а на рис.2 – отечественными специалистами во время также летней грозы (г. Макеевка, Украина, 2008 год [7]).



Рисунок 1 – Общий вид ПУМ в отдельно стоящее в поле дерево [6]



Рисунок 2 – Результаты воздействия ПУМ в условиях города на тополь [7]

## 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ И НЕКОТОРЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ДРЕВЕСИНЫ

Начнем с того, что древесиной принято называть волокнистую ткань, содержащуюся в стволе дерева любой породы, освобожденном от его коры [8]. Ствол дерева состоит из растительных клеток разной формы и величины, имеющих разное назначение в растущем («живом») дереве. Макроструктуру ствола можно хорошо рассмотреть на его торцевом срезе (рис. 3), где четко видны: *кора*, *камбий* и *древесина*. *Кора* состоит из наружной кожицы, пробкового слоя под ней и луба – внутреннего слоя, под которым у растущего дерева находится *камбий* – тонкий слой, состоящий из размножающихся делением «живых» растительных клеток. *Древесина* деревьев различных пород состоит из вытянутых вдоль ствола дерева веретенообразных клеток – пустотелых ячеек, стенки которых состоят из целлюлозы – природного линейного высокомолекулярного полимера [8]. Камбий ежегодно в вегетативный период для дерева (весна – осень) откладывает внутрь его ствола основную часть клеток ранней древесины. Поэтому древесина состоит из ряда концентрических годовых колец (см. рис. 3). Со временем клетки внутренних колец древесины отмирают и полые трахеиды поздней древесины сохнут и значительно уменьшаются в своих поперечных размерах. С учетом отмеченного выше во Введении остановимся лишь на микроскопическом строении древесины хвойных пород.



Рисунок 3 – Типичный вид торцевого среза высушенной на воздухе при комнатной температуре древесины, подвергшейся естественному процессу разрушения (раскалыванию) из-за своего радиального трещинообразования

Клетки древесины хвойных пород (ель, сосна, лиственница, кедр и пихта) состоят, главным образом, из пустотелых трахеид овальной формы, приближающейся к прямоугольной и квадратной конфигурациям с закругленными углами [8]. На долю таких трахеид в рассматриваемой породе деревьев приходится до 95 % общего объема древесины. В растущем дереве по этим вертикально расположенным полым трахеидам – капиллярным сосудам, сообщаемым между собой с помощью микроскопических отверстий, передвигается влага с растворенными в ней химическими соединениями от корней к его кроне. Геометрические размеры отдельных полых трахеид, например, для сосны, могут принимать следующие численные значения [9]: ширина  $b_T = 44,6$  мкм; толщина стенки  $h_T = 4,3$  мкм; длина  $l_T = 3,25$  мм. Между собой рассматриваемые полые трахеиды сосны и других хвойных пород деревьев скреплены при помощи лигнина [10], выполняющего в древесине функцию склеивающего вещества. Благодаря лигнинному прослойкам в хвойных породах деревьев обеспечивается механическая прочность их древесины при ее растяжении поперек своих волокон (полых трахеид со склеенными со всех сторон стенками из высокопрочных продольно ориентированных волокон целлюлозы) и при ее радиальном раскалывании, а также при ее продольном скалывании вдоль указанных волокон древесины. Что касается известных основных физико-механических свойств древесины хвойных пород, то, например, для сосны согласно [11] временное сопротивление раскалыванию  $\sigma_p$  по радиальной плоскости древесины составляет около 4,11 МПа, временное сопротивление продоль-

ному сжатию (вдоль волокон древесины)  $\sigma_c = 45,8$  МПа, а временное сопротивление поперечному статическому изгибу (поперек волокон древесины)  $\sigma_u = 87,3$  МПа.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПУМ

Рассмотрим растущую или «живую» древесину такого представителя хвойных пород как растущей сосны, испытывающую в атмосферном воздухе при нормальных условиях (при давлении  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па и температуре  $T_0 = 0$  °С [12]) воздействие ПУМ. Примем, что при ПУМ в древесину сосны по круглому цилиндрическому плазменному каналу молнии наружным радиусом  $r_{0m}$  протекает униполярный импульс грозового тока  $i_L(t)$ , зависимость которого во времени  $t$  описывается следующим аналитическим выражением [13]:

$$i_L(t) = \beta_m I_{mL} [\exp(-a_1 t) - \exp(-a_2 t)], \quad (1)$$

где  $I_{mL}$  – амплитуда аperiodического импульса тока молнии;  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты временной формы тока молнии ( $a_1 \approx 0,76/\tau_f$ ;  $a_2 \approx 2,37/\tau_f$ ;  $\tau_f$  и  $\tau_p$  – соответственно длительность фронта и длительность импульса тока молнии);  $\beta_m = \left[ (a_1 / a_2)^{a_1/(a_2-a_1)} - (a_1 / a_2)^{a_2/(a_2-a_1)} \right]^{-1}$  – нормирующий коэффициент для принятой временной формы импульса тока молнии.

Считаем, что при ПУМ после привязки указанного канала молнии к исследуемой древесине импульсный ток согласно (1) протекает по наиболее увлажненным трахеидам ранней древесины сосны, прилегающим к камбию ствола рассматриваемой породы дерева. Данные трахеиды сосны будут иметь наибольшую электрическую проводимость и поэтому они в поперечном сечении ствола древесины будут характеризоваться наименьшей продольной электрической прочностью. Именно их электрическая прочность и будет определять электрическую прочность древесины сосны в целом. В пользу такого допущения свидетельствуют результаты реального воздействия линейной молнии, приведенные на рис. 2. Пусть временная форма аperiodического импульса тока молнии  $i_L(t)$  по (1) характеризуется длительностью фронта  $\tau_f = 2$  мкс и длительностью токового импульса на половине его амплитуды  $I_{mL} = 100$  кА, равной  $\tau_p = 50$  мкс [13]. Тогда, время  $t_{mL}$ , соответствующее данной амплитуде

$I_{mL}$  тока молнии, будет равным  $t_{mL} = \ln(a_2 / a_1) \cdot (a_2 - a_1)^{-1} = 3,71$  мкс [14]. Полагаем, что поперечное сечение трахеиды древесины сосны длиной  $l_T$  можно приближенно представить в виде поперечного сечения полого цилиндра с толщиной стенки, равной  $h_T = (R_2 - R_1)$ . На рис. 4 в цилиндрической системе координат приведена принятая нами расчетная конструкция отдельной трахеиды сосны, испытывающей воздействие ПУМ и продольное растекание вдоль нее определенной части аperiodического импульса тока молнии согласно (1).

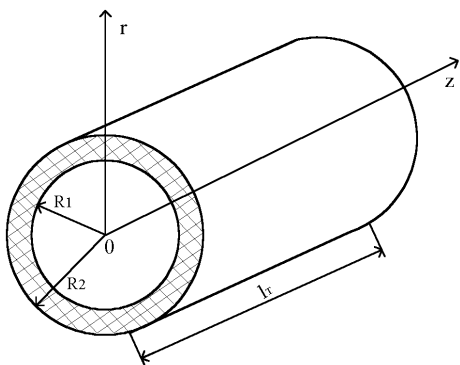


Рисунок 4 – Расчетная конструкция круглой полый цилиндрической трахеиды древесины сосны, испытывающей при ПУМ продольное воздействие тока линейной молнии

Напряженное состояние при ПУМ круглой полый трахеиды древесины сосны с током молнии, протекающим вдоль ее влаги, сосредоточенной внутри ее полого цилиндрического объема  $V_T = \pi R_1^2 l_T$ , определяем с учетом только наличия нормальных сил в ее тонкой стенке из целлюлозы и при условии пренебрежения изгибающими моментами в трахеиде древесины. Так как края и бока исследуемой трахеиды древесины достаточно жестко зашпелены снизу, сверху и с ее боковой поверхности в цилиндрическом объеме древесины растущей сосны, то данное допущение будет практически выполняться в реальных условиях воздействия на нее ПУМ и соответственно импульсного тока молнии (1).

### 3. ПРИБЛИЖЕННЫЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПУМ

**1. Пародинамическая модель разрушения древесины.** На основе безмоментной теории цилиндрических оболочек [15] рассмотрим в цилиндрической системе координат при ПУМ напряженное состояние круглой тонкостенной трахеиды древесины сосны с протекающим внутри ее полого и заполненного влагой цилиндрического объема импульсом тока линейной молнии (1) с указанными АВП. Для этого в тонкой целлюлозной стенке исследуемой цилиндрической трахеиды древесины выделим малый элемент, показанный на рис. 5.

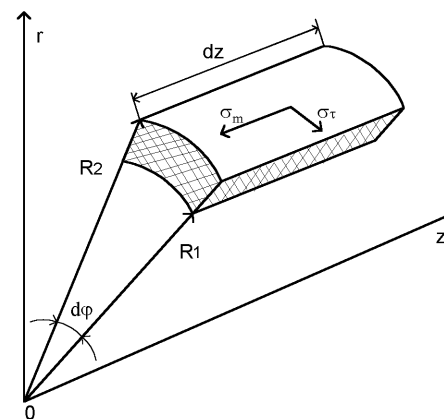


Рисунок 5 – Расчетный элемент круглой полый цилиндрической трахеиды древесины сосны с током линейной молнии для определения при ПУМ напряженного состояния ее стенки

С учетом принятых допущений на выделенный элемент тонкой стенки трахеиды древесины при ПУМ будут действовать только главные нормальные механические напряжения (см. рис. 5), которые обозначим следующим образом:  $\sigma_m$  – меридиональное напряжение (действует вдоль продольной оси трахеиды) и  $\sigma_\tau$  – тангенциальное напряжение (действует вдоль окружности трахеиды). В соответствии с положениями безмоментной теории цилиндрических оболочек данные механические напряжения будут распределены равномерно по толщине  $h_T$  стенки рассматриваемой трахеиды и ее выделенного элемента [15]. Воспользовавшись уравнением Лапласа из области гидродинамики [16], полученным еще в начале 19-го столетия при изучении поверхностного натяжения в жидкостях, можно показать, что в рассматриваемом случае для нормальных напряжений  $\sigma_m$  и  $\sigma_\tau$  на срединной поверхности в выделенном элементе стенки трахеиды древесины при протекании вдоль нее части тока молнии вида 2/50 мкс будут справедливы следующие аналитические соотношения:

$$\sigma_m = p(R_1 + R_2) / 4(R_2 - R_1); \quad (2)$$

$$\sigma_\tau = p(R_1 + R_2) / 2(R_2 - R_1), \quad (3)$$

где  $p$  – избыточное давление, симметрично действующее изнутри на тонкую целлюлозную стенку цилиндрической трахеиды древесины.

Из (2) и (3) следует, что при ПУМ тангенциальное напряжение  $\sigma_\tau$ , растягивающее стенку трахеиды древесины по окружности, в два раза превышает меридиональное напряжение  $\sigma_m$ , действующее вдоль образующей круглой тонкой цилиндрической трахеиды древесины сосны и иных хвойных пород. В рамках пародинамической модели разрушения древесины при ПУМ считаем [17], что давление  $p$  для (2) и (3) внутри полого цилиндрического объема ее трахеиды создается за счет интенсивного джоулева нагрева и высокоскорост-

ного испарения влаги, содержащейся в указанном внутреннем объеме трахеиды. Учитывая быстропотекающий (взрывной) характер воздействия ПУМ на стадии протекания импульсной компоненты (1) тока молнии на исследуемую древесину (в течение сотен микросекунд [14]), можно величину внутреннего объема  $V_T$  трахеиды древесины принять неизменной во время протекания вдоль нее части импульса тока молнии  $i_L(t)$ . Тогда для абсолютного давления  $p_1$  внутри полых трахеиды древесины при рассмотрении пародинамической модели ее разрушения при ПУМ запишем следующее выражение [18]:

$$p_1 = p_0 (1 + \alpha_p T), \quad (4)$$

где  $\alpha_p = (273,15)^{-1}$  – термодинамический коэффициент давления,  $(^\circ\text{C})^{-1}$ ;  $T$  – температура газа (водяного пара) внутри полых трахеиды древесины,  $^\circ\text{C}$ .

Из (4) видно, что давление  $p_1$  внутри трахеиды древесины сосны прямо пропорционально температуре возникающего в ее полости цилиндрическом объеме  $V_T$  газа (перегретого водяного пара). Так, согласно (4) при  $T = 100^\circ\text{C}$  избыточное давление  $(p_1 - p_0)$  водяного пара принимает численное значение, равное  $0,37 \cdot 10^5$  Па, при  $T = 1000^\circ\text{C}$  –  $3,71 \cdot 10^5$  Па, а при  $T = 12000^\circ\text{C}$  –  $44,5 \cdot 10^5$  Па. Заметим, что в последнем случае возникающее избыточное давление  $(p_1 - p_0) = 4,45$  МПа внутри трахеиды древесины превышает временное сопротивление раскалыванию  $\sigma_p = 4,11$  МПа по радиальной плоскости древесины сосны [11]. Для рассматриваемой трахеиды древесины сосны с учетом (4) при  $R_2 = b_T/2 = 22,3$  мкм,  $R_1 = 18$  мкм,  $h_T = 4,3$  мкм,  $T = 2500^\circ\text{C}$  и  $(p_1 - p_0) = 9,27 \cdot 10^5$  Па согласно (3) тангенциальное напряжение  $\sigma_\tau$  в ее стенке оказывается равным 4,34 МПа. Данное механическое напряжение в тонкой целлюлозной стенке трахеиды сосны становится больше, чем указанное выше ее временное сопротивление раскалыванию  $\sigma_p = 4,11$  МПа [11]. Поэтому уровень температуры  $T$  в несколько тысяч градусов Цельсия для газа (водяного пара), образовавшегося в зоне камбия внутри тонкостенной цилиндрической трахеиды древесины сосны от прохождения по ней импульса тока линейной молнии  $i_L(t)$ , будет приводить к ее высокоскоростному электродинамическому разрушению. Об этом качественно свидетельствуют и данные разрушения при ПУМ древесины тополя на рис. 2. Такое взрывообразное разрушение множества склеенных слабопрочным лигнином друг с другом целлюлозных стенок полых трахеид древесины, оказавшихся в зоне действия ПУМ, будет вызывать радиальное раскалывание молнией круглого ствола дерева сосны или иной хвойной породы.

**2. Плазмодинамическая модель разрушения древесины.** Рассмотрим далее другую возможную модель электродинамического разрушения при ПУМ древесины, основанную на воздействии низкотемпературной плазмы канала линейной молнии на исследуемую цилиндрическую трахеиду сосны. Протекание тока линейной молнии по рассматриваемой древесине, поражаемой действием ПУМ, связано с непосредственным распространением вдоль ее полых

трахеид с их внутренней влагой сильноточного плазменного канала линейной молнии. Известно, что внутри сильноточного цилиндрического плазменного канала линейной молнии при учете проявления в нем пинч-эффекта газодинамическое давление  $p_2$  описывается следующей известной формулой [13,14]:

$$p_2 = \frac{m_0 i_L^2(t)}{8\pi^2 r_{0m}^2} \left[ 2 - \left( \frac{r}{r_{0m}} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $r_{0m}$  – внешний радиус плазменного канала молнии;  $0 \leq r \leq r_{0m}$  – текущий радиус плазменного канала молнии;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

Из (5) видно, что в рассматриваемом канале молнии наибольшее значение газодинамического давления  $p_2$  будет наблюдаться при амплитуде ее тока  $I_{mL}$  на его оси ( $r = 0$ ). В этой связи при рассмотрении здесь плазмодинамической модели разрушения молнией древесины сосны (хвойных пород) вначале примем, что исследуемая уединенная тонкостенная цилиндрическая трахеида древесины сосны находится в центре плазменного канала тока молнии ( $r = 0$ ), являющемся наиболее электродинамически и соответственно механически напряженным при ПУМ местом древесины. Для определения в (5) величины  $r_{0m}$  воспользуемся известным расчетным выражением, вытекающим из формулы Брагинского для радиуса сильноточного канала электрического разряда в атмосферном воздухе при принятых нами в нем нормальных условиях [19]:

$$r_{0m} = 0,093(I_{mL})^{1/3} \cdot (t_{mL})^{1/2}. \quad (6)$$

При  $I_{mL} = 100$  кА и  $t_{mL} = 3,71$  мкс из (6) получаем, что  $r_{0m} = 8,31$  мм. Тогда в рассматриваемом идеализированном случае, не учитывающем влияние протекания части тока молнии по соседним с исследуемой трахеидой и кольцевым образом окружающим ее другим трахеидам древесины, из (5) при  $r = 0$ ;  $i_L(t) = I_{mL} = 100$  кА и  $r_{0m} = 8,31$  мм находим, что газодинамическое давление  $p_2$  внутри уединенной полых трахеиды сосны составит 4,61 МПа. При этом избыточное давление  $(p_2 - p_0)$  внутри такой уединенной трахеиды может оказаться примерно равным 4,51 МПа. В соответствии с [11] это давление внутри трахеиды будет превышать временное сопротивление раскалыванию  $\sigma_p = 4,11$  МПа для древесины сосны. Заметим, что на краю плазменного канала молнии ( $r = r_{0m}$ ) согласно (5) при указанных АВП для импульса тока молнии избыточное давление  $(p_2 - p_0)$  внутри исследуемой уединенной трахеиды древесины составит около 2,21 МПа. Данное давление в соответствии с (3) вызовет появление в целлюлозной стенке этой трахеиды сосны тангенциального механического напряжения  $\sigma_\tau$ , равного около 10,3 МПа и превышающего значение  $\sigma_p$ . Поэтому можно достаточно обоснованно заключить, что при ПУМ в древесину сосны давление плазмы сильноточного канала молнии в зонах своей привязки и протекания вдоль ее полых цилиндрических трахеид грозового тока вида (1) с принятыми АВП достигает уровней, достаточных для электродинамического разрушения древесины сосны путем ее радиального раскалывания.



## ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты электрофизических исследований, связанных с оценкой давлений и нормальных механических напряжений, возникающих в уединенной круглой цилиндрической тонкостенной трахеиде древесины сосны при ПУМ в указанную древесину и продольном протекании внутри этой целлюлозной трахеиды с влагой импульсной компоненты тока молнии 2/50 мкс.
2. На основании двух разработанных электродинамических моделей разрушения при ПУМ древесины расчетным путем впервые показано, что линейная молния может вызывать радиальное раскалывание древесины сосны.

**Список литературы:** 1. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Комплекс высоковольтного испытательного электрофизического оборудования экспериментальной базы НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 4. – С. 3-13. 2. Рудаков В.В., Недзельский О.С.. Исследование импульсной электрической прочности крупногабаритных клееных деревянных конструкций // Вестник ХПИ. Серия «Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок». – Харьков: ХПИ. – 1993. – Вып. 18. – С. 73-77. 3. *International standard IEC 61000-4-32. Part 4-32: Testing and measurement techniques-High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium.* – Geneva, Switzerland, 2002. – 108 p. 4. *Slitskouhov Yu., Budanov V., Garpoev M. et al.* Wooden and Plastic Structures. – М.: Mir Publishers, 1989. – 400 p. 5. Баранов М.И., Носенко М.А. Исследование термического действия тока искусственной молнии на образцы металлической обшивки летательного аппарата авиационной техники // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Том 82. – № 5. – С. 972-980. 6. [http:// www.poster cartel.com/ fi/ 1700-4570.aspx?o=2300-8501](http://www.poster cartel.com/ fi/ 1700-4570.aspx?o=2300-8501). 7. <http:// ru.wikipedia.org/wiki/молния>. 8. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с. 9. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине: Справочник / Под ред. Б.Н.Уголева. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 296 с. 10. Плугин Д.А. Механизм усушки и набухания древесины // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – Харьков: ХГАГХ. – 2002. – Вып. 43. – С. 289-295. 11. Стрекаловский Н.И. О технических свойствах древесины сосны бассейна реки Ваги // Труды Архангельского лесотехнического института. – Архангельск: АЛТИ. – 1939. – Вып. XI. – С. 3-50. 12. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с. 13. Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Технічна електродинаміка. – 1999. – № 1. – С. 16-21. 14. Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – № 7, т. 1. – С. 58-70. 15. *Сопротивление материалов: Учебник для ВУЗов / Под общ. ред. П.С.Писаренко.* – Киев: Вища школа, 1979. – 696 с. 16. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Монахов Н.И. и др. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1968. – 595 с. 17. Баранов М.И., Лисенко В.О. Моделирование электродинамических процессов в відокремленому капілярі дерев'яної конструкції при дії на неї прямого удару блискавки // Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. – Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 20-22 травня 2009 р.), Частина II. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 334. 18. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Ч. 1. – М.: Наука, 1965. – 350 с. 19. Баранов М.И. Приближенный расчет электрической эрозии металлических электродов высоковольтных силовоточных искровых коммутаторов // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 11-14.

Поступила в редколлегию 09.11.2009

М.И.БАРАНОВ, докт.техн.наук, главн.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;  
М.А.НОСЕНКО, науч.сотр., НТУ «ХПИ»

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ЛИНЕЙНОЙ МОЛНИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ОБШИВКУ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Наведено різніну схему рішення задачі електротеплової дії імпульсної складової струму блискавки при прямому ударі її в металеву обшивку літального апарату. Представлено результати апробації розробленої чисельної моделі при дії зазначеної складової струму блискавки на алюмінієві зразки обшивки літального апарату.

Difference scheme for a solution of electrothermal problem influence of pulse component of lightning current at its direct stroke in metal covering of aircraft is given. The results of approbation of the developed numerical model at action of the specified component of lightning current on aluminium specimen of aircraft covering are presented.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Линейные молнии достаточно часто попадают в самолеты, летающие в земной воздушной атмосфере (для мирового авиапарка в среднем до трех раз в год) [1]. Одной из наиболее тяжелых авиационных аварий с катастрофическими последствиями, вызванной линейной молнией, является та, которая произошла 8 декабря 1963 года в районе г. Эклтон (штат Мэрилэнд, США) [1]. Тогда попавшая в самолет гражданской авиации молния проникла в его резервный бак горючего, что привело к его воспламенению и взрыву всего самолета. Поэтому вопросы термического воздействия тока молнии на обшивку летательного аппарата (ЛА) являются актуальными для разработчиков ЛА во многих странах мира. Теоретические исследования, посвященные приближенным оценкам теплового воздействия тока молнии на металлическую обшивку ЛА, содержат, как правило, одномерные модели температурного поля в зоне действия плазменного канала молнии [2-4]. В [5] было представлено численное решение двумерной электротепловой задачи для плоской металлической обшивки ЛА конечной толщины, подверженной воздействию длительной составляющей тока молнии. Определенный интерес представляет решение подобной задачи для импульсной составляющей тока молнии, характеризующейся амплитудой в сотни килоампер и полной длительностью в сотни микросекунд.

## 2 ПОСТАНОВКА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ

При решении двумерной электротепловой задачи воздействия импульсной составляющей тока молнии  $i_m(t)$  на размещенный в атмосферном воздухе с температурой  $\theta_0 = 0$  °С плоский образец тонкостенной металлической обшивки